



다양한 기저유출 분리 방법을 이용한 4대강 수계의 시간대별 (연·계절·월) 기저유출 기여도 분석

Analysis of Baseflow Contribution based on Time-scales Using Various Baseflow Separation Methods

이승찬* · 김희연* · 김효정* · 한정호* · 김성준** · 김종건*** · 임경재*[†]

Lee, Seung Chan · Kim, Hui Yeon · Kim, Hyo Jeong · Han, Jeong Ho · Kim, Seong Joon · Kim, Jonggun · Lim, Kyoung Jae

Abstract

The analysis of baseflow contribution is very significant in Korea because most rivers have high variability of streamflow due to the monsoon climate. Recently, the importance of such analysis is being more evident especially in terms of river management because of the changing pattern of rainfall and runoff resulted from climate change. Various baseflow separation methods have been developed to separate baseflow from streamflow. However, it is very difficult to identify which method is the most accurate way due to the lack of measured baseflow data. Moreover, it is inappropriate to analyze the annual baseflow contribution for Korean rivers because rainfall patterns varies significantly with the seasons. Thus, this study compared the baseflow contributions at various time-scales (annual, seasonal and monthly) for the 4 major river basins through BFI (baseflow index) and suggested baseflow contribution of each basin by the BFI ranges searched from different baseflow separation methods (e.g., BFLOW, HYSEP, PART, WHAT). Based on the comparison of baseflow contributions at the three time scales, this study showed that the baseflow contributions from the monthly and seasonal analysis are more reasonable than that from the annual analysis. Furthermore, this study proposes that defining BFI with its range is more proper than a specific value for a watershed, considering the difference of BFIs between various baseflow separation methods.

Keywords: baseflow contribution; baseflow index; HYSEP; WHAT

1. 서론

최근 들어 가속화된 기후변화는 전 세계적으로 다양한 수문순환의 변화를 야기하고 있다. 우리나라 역시 연평균 기온 상승, 강수일수의 변화, 집중호우의 증가, 무강우일수의 증가 등 기후변화로 인한 다양한 수문순환의 변화가 나타나고 있다 (Kang, 2011). 이러한 수문순환의 변화는 기상패턴의 변화를 초래하여 하천 특성에도 많은 영향을 미치고 있다. 특히 다른 나라의 하천과 비교했을 때 상대적으로 유황의 변동성이 큰 우리나라의 하천은 수문순환의 변화에 매우 민감하다 (Kang et al., 2015). 이에 따라 기후변화에 대응하기 위해서

기후변화를 고려한 전략적인 유역단위 하천관리 계획 수립이 요구되고 있는 상황이다 (Han et al., 2016). 유역단위 하천관리 계획은 기본적으로 관리 대상 유역의 다양한 특징을 반영하여 계획을 수립하여야 한다. 특히 유역에서 이용 가능한 수자원의 양과 필요 수자원의 양을 정확하게 파악할 수 있어야 보다 효율적인 계획 수립이 가능하다. 그 중 하천 유량에 대한 분석은 가장 기본적인 기초자료이자 동시에 가장 중요한 자료 중 하나이다.

하천의 유량은 크게 직접유출과 기저유출로 구성되어 있으며, 직접유출과 기저유출의 기여도에 따라 하천유량의 특성은 큰 차이를 나타낸다 (Hong et al., 2015). 여기서 직접유출이란 강우 시 비교적 짧은 시간에 지표층을 통해 하천으로 유입되는 유출 형태를 말하는 것으로 홍수 발생에 큰 영향을 미친다. 이와 달리 기저유출이란 강우 시 땅속으로 침투된 물이 상대적으로 오랜 시간에 걸쳐 하천으로 이동하는 형태의 유출을 말하며, 건기 또는 청천시의 하천유량에 큰 영향을 미친다 (Choi, 2014). 하지만 땅속을 통해서 유출되는 이동 상 특성으로 인해 기저유출의 측정에는 다양한 경제적·기술적 문제가 있다. 이에 따라 직접유출과는 달리 기저유출의 경우 정확한 측정이 어려우며, 다양한 연구에도 불구하고 연구를 위한

* Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

** Department of Civil & Environmental System Engineering, Konkuk University

*** Institute of Agriculture and Life Science, Kangwon National University

† Corresponding author

Tel.: +82-33-250-6468 Fax: +82-42-870-7499

E-mail: kjlim@kangwon.ac.kr

Received: December 26, 2016

Revised: January 6, 2017

Accepted: January 9, 2017

기초 측정 자료가 미비한 상황이다 (Cho, 2006).

기저유출은 건기 시에 하천유량을 보충해주는 보충원으로 서 하천유량을 유지시켜주는 중요한 수원이다 (Yang and Chi, 2011). 따라서 기저유출은 하천 건천화, 가뭄 등의 문제를 해결하기 위한 중요한 해결책으로 주목되고 있다 (Han et al., 2016). 더욱이, Kim and Lee (2009), Choi et al. (2015), Schilling and Wolter (2001), 등의 연구에 따르면 기저유출은 하천수질에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 갈수기 하천의 수질은 기저유출로 인한 오염부하량에 매우 민감하기 때문에 기저유출의 영향이 큰 농촌 및 임야구역에서는 기저유출로 인한 오염부하에 의해 하천 수질이 큰 영향을 받고 있다고 보고되고 있어 기저유출 관리의 필요성이 제기되고 있다 (Choi et al., 2014). 또한, 최근 기후변화로 인한 장기 가뭄 문제가 빈번하게 발생되면서 기저유출 관리에 대한 관심이 계속해서 증대되고 있는 상황이다.

하천유량 중 기저유출의 기여도를 분석하기 위해서는 먼저 하천 유량을 직접유출량과 기저유출량으로 분리하는 과정이 필요하다 (Lee, 2014). 이를 위해 RECESS (Anderson and Burt, 1980), RORA (Rutledge, 1998), BFLOW (Arnold and Allen, 1999), HYSEP (Sloto and Crouse, 1996), PART (Rutledge, 1998), WHAT (Lim et al., 2005) 등 다양한 기저유출 분리 방법들이 개발되어 활용되고 있다. 하지만 각 방법들의 정확도 분석을 위한 충분한 관측 기저유출 자료의 부재로 기존의 기저유출과 관련한 많은 연구에서는 한 가지 또는 두 가지 분리 방법만을 사용하여 하천유량에 대한 기저유출 기여도를 분석하고 이를 해당 유역에 대한 대푯값으로 제시하고 있다 (Yang et al., 2011; Nam et al., 2013; Han et al., 2016). 각 분리 방법에 대해서 신뢰도 평가가 제대로 이루어지지 못한 상황에서 특정 방법을 통해 산정된 결과를 대푯값으로 제시하기에는 기저유출 분리 방법이 내포하고 있는 불확실성을 고려했을 때 한계가 있을 것으로 판단된다. 또한 우리나라는 몬순기후의 영향으로 우기인 여름철에 연강수량의 약 70% 이상의 강수량이 집중되어 계절별 강수량의 편차가 매우 크게 나타난다. 따라서 기존의 선행연구에서처럼 전체 기간을 대상으로 기저유출 기여도를 분석할 경우 우리나라 하천의 유량 특성을 제대로 반영하기에는 한계가 있다.

따라서 본 연구의 목적은 4대강 수계 (한강, 금강, 낙동강, 섬진·영산강)를 대상으로 다양한 기저유출 분리 방법을 이용해 하천유량 중 기저유출 기여도를 분석하고, 이를 통해 4대강 수계에 대한 기저유출 기여도의 범위를 제시하는 데 있다. 또한 연단위 뿐만 아니라 계절 및 월 단위로 기저유출 기여도를 분석하고, 분석 결과를 통해 계절·월 단위 기저유출 기여도의 변화를 제시하는 데 있다.

II. 방 법

1. 연구대상지역

우리나라의 주요 수계는 크게 한강 수계, 낙동강 수계, 금강 수계, 섬진·영산강 수계로 나뉘어 관리되고 있는데, 본 연구에서는 이 4대강 수계를 대상으로 연구를 진행하였다. 각 수계별 최근 10년 평균 연강수량은 한강 수계 1,360 mm, 낙동강 수계 1,337.4 mm, 금강 수계 1,257.7 mm, 섬진·영산강 수계 1,391.8 mm로써 금강 수계의 연강수량이 가장 작다 (KMA, 2010). 또한 4대강 수계 모두 몬순기후의 영향으로 연강수량의 70% 이상이 여름에 편중된 기후특성을 가지고 있다. 수계별 면적은 한강 수계의 면적이 41,957 km²로 4대강 수계 중에서 가장 큰 면적을 차지하고 있고, 낙동강 수계 23,690 km², 금강 수계 9,912 km², 섬진·영산강 수계 각각 4,914 km², 3,371 km²로 섬진·영산강 수계가 가장 작은 면적을 차지하고 있다.

2. 유량 자료 구축

국내에서는 기술적인 문제와 비용적인 문제로 인해 연구에 활용 가능한 충분한 기저유출 관측 자료가 확보되지 않은 상황이다. 이에 본 연구에서는 4대강 수계의 관측 유량자료를 활용하여 다양한 기저유출 분리법을 통해 기저유출을 분리하였다. 이를 위해 본 연구의 대상지역인 4대강 수계에 위치해 있는 유량관측소를 조사하였다. 국내 유량 관측소는 수자원 공사, 한국농어촌공사, 국토해양부에서 주관하고 있으며, 각 기관에서 관측된 유량자료는 국토교통부에서 관리하고 있는 WAMIS (Water Management Information System)에서 제공되고 있다.

운용 중에 있는 관측소에서 보유하고 있는 자료의 기간이 모두 다르기 때문에 본 연구에서는 각 수계별로 최근 5년 (2011년~2015년) 동안의 유량자료를 보유하고 있는 유량관측소만을 선정하였다. 또한 기저유출의 경우 댐, 대형 보 등의 수리구조물에 의한 영향을 많이 받기 때문에 이러한 요인을 배제하기 위하여 수계에 위치한 댐의 상류지역에 위치한 유량관측소만을 선별하였다. Fig. 1은 본 연구에서 활용한 유량 자료의 관측소를 나타낸 것으로, 각 수계별로 15개씩 총 60개의 유량관측소를 선정하였다.

3. 기저유출 분리 방법

가. BFLOW를 이용한 기저유출 분리

BFLOW (Baseflow filter program)는 기저유출 분리를 위해 가장 많이 사용되어온 방법들 가운데 하나이다 (Willems, 2009; Ahlblame et al. 2013). BFLOW는 신호분석 및 처리

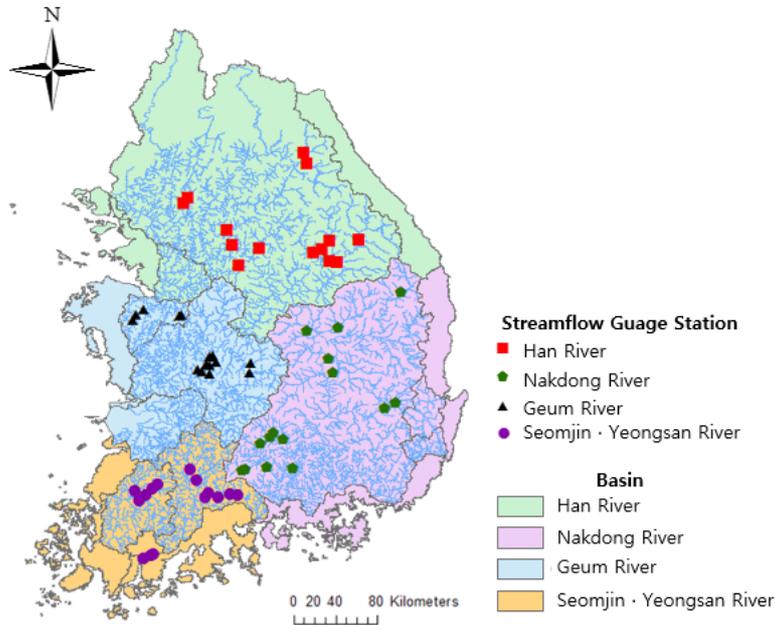


Fig. 1 Streamflow gauge stations of each basin

(Signal analysis processing)에 사용되던 디지털 필터 기술 중 한가지인 one parameter filter를 응용하여 수문곡선으로부터 기저유출을 분리하는 방법이다 (Arnold et al., 1995; Lyne and Holick., 1979). 직접유출과 기저유출의 물리적 특성을 고려하지는 못하지만, 빠른 계산이 가능하고 일관성이 있는 재현이 가능하다는 장점이 있다 (Hong et al., 2015). 다음은 BFLOW에서 사용되는 디지털 필터식이다 (Lyne and Holick, 1979).

$$f_t = a \cdot f_{t-q} + \frac{1+a}{2}(y_t - y_{t-1}) \quad (1)$$

$$b_t = y_t - f_t \quad \text{단, } 0 \leq b_t \leq y_t$$

여기서, y_t = 일 평균유량, f_t = 직접유출, b_t = 기저유출, a = filter parameter이다.

BFLOW는 Pass1, Pass2, Pass3의 필터에 유량자료를 입력하여 기저유출량을 산정하며, Pass1, Pass2, Pass3 순으로 기저유출이 작게 산정된다 (Arnold et al., 1995). 사용자는 Pass1, Pass2, Pass3를 통해 분리된 세 가지의 기저유출 분리 결과 중 연구대상 유역의 특성에 적합한 결과를 선택하여 사용할 수 있다 (Eckhardt, 2008; Schwartz et al., 2012; Lyne and Holick, 1979). 그러나 pass의 선택은 국내의 경우 기저유출에 대한 관측이 많이 이루어지지 못했기 때문에 이에 대한 기준이나 선행연구가 전무한 상황이므로, 이를 결정한 명백한 기준이 충분하지 않다 (Hong et al., 2015). 따라서 본 연구

에서는 Pass1과 Pass3의 중간 범위에 해당하는 Pass2를 이용하였다.

나. HYSEP을 이용한 기저유출 분리

HYSEP은 U.S Geological survey (USGS)에 의해 개발되어서 USGS 사이트에서 배포되고 있는 기저유출 분리를 위한 컴퓨터 프로그램이다. HYSEP 프로그램은 총 3가지 방법 (Fixed interval, Sliding interval, Local minimum)을 사용해서 하천유량 중 기저유출을 분리한다. 이 방법들은 수문곡선으로부터 아래의 식 (2)를 기준으로 산정된 일정한 시간기준에서 유량의 최저점 (Low point)을 연결하여 기저유출을 분리한다. 본 연구에서는 세 가지 방법 중에서 주로 많이 이용되고 있는 Local minimum 방법을 적용하여 분리한 기저유출 값을 사용하였다.

$$N = A^{0.2} \quad (2)$$

여기서, N = 지표유출이 끝난 후의 일수, A 는 유역면적 (mile)이다.

N 의 지수 (여기서는 0.2)는 유역의 특성 (지형, 토지이용도 등)에 따라 달라지고, 시간변수 $2N$ 은, 3~11 사이의 홀수 정수 중 가까운 값을 가진다 (Brodie and Hostetler, 2005; Schwartz et al., 2012). Local minimum 방법은 각 날짜별로 $0.5(2N-1)$ 간격으로 최저 유량을 확인하고, 만약 만족한다면 그것이 local minimum이고 인접한 local minimum과 직선에 의해

연결된다. 따라서 local minimum 사이에 각각의 날 동안 기저유출 값은 직선보간법에 의해 추정된 것을 기준으로 기저유출을 분리하는 방법이다 (Sloto and Michele, 1996).

다. PART을 이용한 기저유출 분리

PART는 USGS에서 개발된 기저유출 분리 프로그램으로써, N-day 방법과 경사급변점 방법을 복합적으로 적용한 방법이다. 일 평균유량 자료를 통해 하천유량으로부터 기저유출을 분리하기 위해 널리 사용되고 있으며, 하천의 일 (day) 유량 데이터를 1차원 배열로 입력하여 선형 보간을 통하여 유출기간동안 기저유출을 추정한다 (Rutledge, 1998). PART는 Knisel and Sheridan (1983)가 제시한 방법으로 수문곡선에서 강우로 인해 직접유출이 발생한 경우에 대해서만 기저유출을 분리하고 이 외 강우가 발생하지 않는 기간에 대해서는 하천유량과 기저유출을 같다고 가정을 한다. 기존의 방법들이 기저유출 분리에서 선행강우의 영향을 받는 것과 달리 PART는 선행감수조건의 영향을 고려하여 기저유출을 분리한다. 따라서 PART에서는 선행감수조건이라는 초기 조건을 만족시키는 지점을 직접유출의 시점과 종점으로 간주한다. PART는 여러 연구에서 다른 기저유출분리방법과 비교하여 기저유출 산정결과의 정확성이 검증되었다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 Shir mohammadi et al. (1987)는 PART를 적용한 기저유출 분리 결과는 장기유출 모의에 적합하다고 보고하였다.

라. WHAT을 이용한 기저유출 분리

WHAT (Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool)은 사용자가 손쉽게 웹을 통해 사용자의 유량자료로부터 기저유출을 분리시킬 수 있는 웹기반 기저유출 분리 방법이다 (Lim et al. 2005; Shin et al., 2010). WHAT은 3가지의 기저유출 분리 방법을 통해 기저유출 분리가 가능하다. 첫 번째로 LMM (Local Minimum Method)는 수문곡선의 감수부에서 직접유출이 감소되고 소멸되어 기저유출로만 하천유량이 구성되는 지점을 연결하여 기저유출을 분리하는 방법이다. 두 번째는 앞서 설명한 BFLOW filter로써, 신호처리 (Signal processing) 분야에서 고주파와 저주파를 분리하기 위해 사용되는 방법을 이용하여 수문곡선으로부터 기저유출을 분리하는 방법이다. 세 번째로 Eckhardt filter를 이용하는 방법이다 (Lim et al., 2010; Eckhardt, 2005). Eckhardt filter는 BFLOW filter를 수정하여 대수층의 특성을 고려할 수 있도록 개선한 방법으로, BFI_{max} (장기간의 총 유출량에 대한 기저유량의 비의 최댓값)라는 변수를 적용하여 대수층의 특성을 고려할 수 있다. 하지만 잘못된 BFI_{max}을 적용할 경우 잘못된 기저유출 분리 결

과가 나올 수 있기 때문에 Eckhardt (2005)는 항시 하천이 흐르고 공극이 많은 대수층, 단속적으로 하천이 흐르고 공극이 많은 대수층, 항시 하천이 흐르고 암반으로 구성된 대수층에 대하여 각각 0.80, 0.50, 0.25로 값을 제안하였다 (Lim et al., 2010; Eckhardt, 2005). 본 연구에서는 BFI_{max}은 토양환경 정보시스템 (<http://soil.rda.go.kr/soil>) 에서 제공하는 전국 배수등급 통계자료를 참고하여 항시 하천이 흐르고 암반으로 구성된 대수층에 해당하는 0.80을 적용하였다. 다음은 Eckhardt filter 식이다.

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{max})\alpha + b_{t-1} + BFI_{max} Q_t}{1 - \alpha BFI_{max}} \quad (3)$$

여기서, b_t = t시간에 분리된 기저유출량 (m^3/s), b_{t-1} = t-1 시간에 분리된 기저유출량 (m^3/s), Q_t = t시간에 전체 하천유출량 (m^3/s), BFI_{max} = 장기간의 총 유출량에 대한 기저유량의 비의 최댓값이다.

4. 기저유출비

기저유출비 (Baseflow index; BFI)는 하천 전체 유량 중 기저유출이 차지하는 비율을 의미하고, 하천의 유량 특성에 대해서 나타낼 수 있는 지표이다 (Bloomfield et al., 2009). BFI는 두 가지의 방법으로 계산될 수 있다. 우선 전체 기간에 대해 기저유출 분리를 한 후 아래의 식과 같이 각 연도별 BFI를 계산하는 것이다. 다른 방법으로는 연도별로 기저유출을 분리하여 BFI를 산정하는 것이다. 후자의 방법 적용 시 1월 초와 12월 말에 해당하는 기간의 유량자료를 제외하고 BFI를 산정해야한다 (Gustard et al., 1992; Deelstra and Lital, 2008). 본 연구에서는 전자의 방법을 적용하여 2011년에서 2015년까지 연별, 계절별, 월별 BFI를 산정한 후 그 값의 평균값을 계산하여 5년 기간에 대한 BFI를 산정하였다.

$$BFI = \frac{V_B}{V_A} \quad (4)$$

여기서, V_A = 총 유출량 (일평균 유량의 합), V_B = 총 기저유출량 (기저유출량의 합)이다.

III. 결과 및 고찰

1. 연별 BFI 분석

Table 1은 한강, 낙동강, 금강, 섬진·영산강 수계의 2011~

Table 1 Comparison of annual BFIs and their ranges

Basin	Year	BFLOW	HYSEP	PART	WHAT	Range
Han	2011	0.62	0.77	0.83	0.79	0.62 ~ 0.83
	2012	0.66	0.78	0.85	0.80	0.66 ~ 0.85
	2013	0.67	0.75	0.85	0.80	0.67 ~ 0.85
	2014	0.67	0.74	0.86	0.79	0.67 ~ 0.86
	2015	0.70	0.78	0.86	0.80	0.70 ~ 0.86
	5 yr	0.66	0.76	0.85	0.80	0.66 ~ 0.85
Nakdong	2011	0.68	0.77	0.84	0.80	0.68 ~ 0.84
	2012	0.68	0.77	0.82	0.80	0.68 ~ 0.82
	2013	0.67	0.74	0.82	0.81	0.67 ~ 0.82
	2014	0.65	0.73	0.80	0.80	0.65 ~ 0.80
	2015	0.70	0.78	0.83	0.80	0.70 ~ 0.83
	5 yr	0.68	0.76	0.82	0.80	0.68 ~ 0.82
Geum	2011	0.58	0.71	0.74	0.76	0.58 ~ 0.76
	2012	0.61	0.74	0.76	0.75	0.61 ~ 0.76
	2013	0.63	0.72	0.79	0.77	0.63 ~ 0.79
	2014	0.66	0.75	0.77	0.77	0.66 ~ 0.77
	2015	0.65	0.77	0.78	0.76	0.65 ~ 0.78
	5 yr	0.63	0.74	0.77	0.76	0.63 ~ 0.77
Seomjin · Youngsan	2011	0.68	0.77	0.79	0.79	0.68 ~ 0.79
	2012	0.68	0.78	0.77	0.78	0.68 ~ 0.78
	2013	0.70	0.78	0.80	0.81	0.70 ~ 0.81
	2014	0.68	0.76	0.79	0.79	0.68 ~ 0.79
	2015	0.71	0.78	0.80	0.80	0.71 ~ 0.80
	5 yr	0.69	0.77	0.79	0.79	0.69 ~ 0.79
Total	2011	0.64	0.76	0.80	0.79	0.64 ~ 0.80
	2012	0.66	0.77	0.80	0.78	0.66 ~ 0.80
	2013	0.67	0.75	0.82	0.80	0.67 ~ 0.82
	2014	0.67	0.75	0.81	0.79	0.67 ~ 0.81
	2015	0.69	0.78	0.82	0.79	0.69 ~ 0.82
	5 yr	0.67	0.76	0.81	0.79	0.67 ~ 0.81

5 yr: 5 years average

2015년 유량자료에 4가지 기저유출 분리 방법(BFLOW, HYSEP, PART, WHAT)을 적용하여 기저유출 분리 방법에 따른 연별 BFI와 5년 평균 BFI를 산정하고, 이를 통해 BFI의 범위를 제시한 것이며, Fig. 2는 이를 그림으로 나타낸 것이다. 5년 평균 연별 BFI 산정 결과 각 수계별로 한강 수계 0.66~0.85, 낙동강 수계 0.68~0.82, 금강 수계 0.63~0.77, 섬진·영산강 수계 0.69~0.79로 나타났다. 4대강 수계 전체의 5년 평균 연별 BFI는 0.67~0.81으로 한강 수계, 낙동강 수계, 섬진·영산강 수계의 5년 평균 연별 BFI와 유사한 값을 나타냈으며, 금강 수계의 5년 평균 연별 BFI가 상대적으로 가장

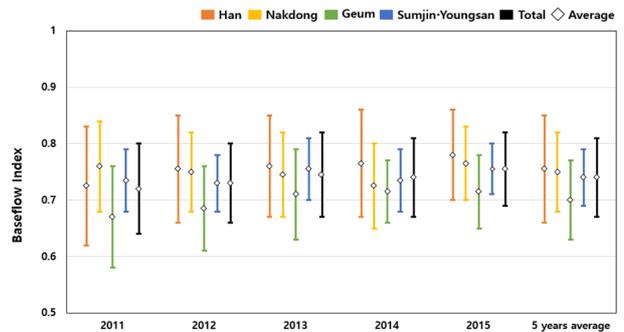


Fig. 2 Annual BFI ranges of each basin

낮은 것으로 분석되었다. 이를 통해 4대강 수계 중 금강 수계에서 하천유량에 대한 기저유출의 기여도가 가장 작은 것으로 확인되었다. 금강과 각 수계의 5년 평균 BFI의 차이는 한강과 0.0425, 낙동강과 0.04, 섬진·영산강과 0.035의 차이를 보여 평균 4%의 BFI의 차이를 보였다. 하천유량에 대한 기저유출의 기여도는 강수량, 강수일수, 대수층의 특성, 토양의 특성 등의 자연적인 요인과 불투수층의 비율, 지하수의 이용과 같은 인위적인 요인에 의해 결정된다. 따라서 향후 이러한 요인들을 고려하여 금강 수계에서의 기저유출 기여도가 상대적으로 타 수계에 비해 낮은 원인을 파악하는 것이 필요하며, 이에 앞서 기저유출 기여도에 대한 자연적 요인과 인위적 요인의 영향을 정량화하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 1에서 동일한 수계에 기저유출 분리 방법에 따라 BFI 산정결과는 큰 차이를 나타냈다. 이는 Fig. 2를 통해 쉽게 확인할 수 있으며, 가장 큰 BFI값의 차이가 나타난 한강 수계의 2011년 BFI의 경우 최소 0.62에서 최대 0.83으로 BFI 값의 차이는 0.21로 확인되었다. 이는 기저유출량 산정에 있어 약 20% 까지 차이가 발생할 수 있음을 보여준다. 이와 같은 기저유출 분리 방법에 따른 결과값의 차이는 각각의 방법에서 서로 다른 알고리즘을 통해 기저유출을 분리하기 때문이다. 이를 통해 단일 기저유출 분리 방법을 적용하여 산정된 BFI

를 대상 유역의 대푯값으로 제시하기에는 한계가 있다는 점을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구의 결과로 미루어보아 기저유출 기여도 분석을 위한 BFI 산정 시 단일 방법으로 산정된 단일 BFI는 매우 큰 불확실성을 포함하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 단일 방법으로 산정된 BFI를 유역의 대푯값으로 제시하는 것보다 다양한 방법으로 산정된 BFI 결과를 통해 대상 유역에 대한 BFI의 가능 범위를 제시하는 것이 상대적으로 합리적인 것으로 판단된다.

2. 계절별 BFI 분석 및 비교

본 연구에서는 3~5월을 봄으로, 6~8월을 여름, 9~11월을 가을, 12~2월을 겨울로 구분하여 계절별 BFI를 산정하였다. Table 2는 한강, 낙동강, 금강, 섬진·영산강 수계를 대상으로 2011~2015년의 유량자료에 대해 4가지 기저유출 분리 방법 (BFLOW, HYSEP, PART, WHAT)을 계절별 BFI를 산정한 결과를 정리한 것이며, Fig. 3은 이를 그림으로 나타낸 것이다.

Table 2와 Fig. 3에서 확인할 수 있듯이, 4대강 수계 모두 계절별 BFI는 큰 차이를 나타냈다. 모든 수계에서 여름의 BFI가 가장 낮게 산정되었으며, 전반적으로 봄과 여름의 BFI가 가을과 겨울의 BFI에 비해 작은 값을 나타냈다. 이는 하천 유량에 대한 기저유출의 기여도는 봄과 여름에 작고 가을과 겨

Table 2 Comparison of seasonal BFI and their ranges

Basin	Year	BFLOW	HYSEP	PART	WHAT	Range
Han	spring	0.66	0.75	0.86	0.78	0.66 ~ 0.86
	summer	0.54	0.67	0.74	0.76	0.54 ~ 0.76
	autumn	0.73	0.81	0.88	0.85	0.73 ~ 0.88
	winter	0.73	0.82	0.92	0.79	0.73 ~ 0.92
Nakdong	spring	0.67	0.73	0.83	0.79	0.67 ~ 0.83
	summer	0.55	0.65	0.69	0.76	0.55 ~ 0.76
	autumn	0.70	0.78	0.85	0.84	0.70 ~ 0.85
	winter	0.78	0.87	0.91	0.82	0.78 ~ 0.91
Geum	spring	0.58	0.72	0.77	0.75	0.58 ~ 0.77
	summer	0.56	0.67	0.67	0.73	0.56 ~ 0.73
	autumn	0.69	0.77	0.81	0.80	0.69 ~ 0.81
	winter	0.67	0.79	0.83	0.77	0.67 ~ 0.83
Seomjin	spring	0.69	0.76	0.81	0.79	0.69 ~ 0.81
	summer	0.54	0.67	0.63	0.73	0.54 ~ 0.73
Youngsan	autumn	0.71	0.80	0.82	0.83	0.71 ~ 0.83
	winter	0.79	0.88	0.89	0.82	0.79 ~ 0.89
Total	spring	0.65	0.74	0.82	0.78	0.65 ~ 0.82
	summer	0.55	0.67	0.69	0.75	0.55 ~ 0.75
	autumn	0.71	0.79	0.84	0.83	0.71 ~ 0.84
	winter	0.74	0.84	0.89	0.80	0.74 ~ 0.89

울에 크다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 우리나라의 기후 특성으로 인한 것으로, 우리나라는 여름철에 연강수량의 약 2/3 이상이 집중되어 있기 때문에 여름철 강우로 인해 많은 양의 지표유출수가 발생한다. 따라서 여름철 하천유량 중 직접 유출량이 차지하는 부분이 증가하게 된다. 이에 하천유량에

대한 직접유출의 기여도가 기저유출 기여도보다 크게 나타나고, 이로 인해 본 연구의 결과와 같이 여름철 기저유출 기여도가 상대적으로 다른 계절에 비해 매우 작다. 반대로 겨울의 경우 영하로 내려가는 기온으로 인해 강설 시 강설의 대부분이 지표면에 적설 (snowpack) 형태로 존재하게 되며, 이는 봄철에 기온이 상승함에 따라 지표층을 통해 직접유출 형태로 하천으로 유입된다(Lee et al., 2003). 따라서 겨울에는 강설이 발생하더라도 직접유출이 거의 발생되지 않아 하천유량에 대한 기저유출의 기여도가 매우 높다. 본 연구의 결과는 이러한 국내 기후 특성을 적절히 반영한 결과로 판단된다.

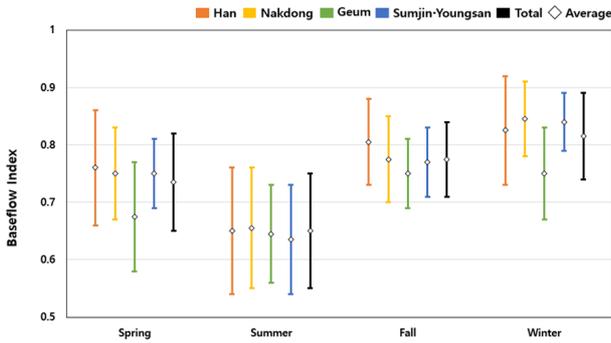


Fig. 3 Seasonal BFI ranges of each basin

3. 월별 BFI 분석 및 비교

Table 3은 2011~2015년의 유량자료에 4가지 기저유출 분리 방법을 적용하여 5년 평균 월별 BFI 산정 결과를 정리한 것이며, Fig. 3은 이를 그림으로 나타낸 것이다. 수계별로 살펴보면 한강 수계의 경우 모든 기저유출 분리 방법에 대해서 7월과 8월의 BFI가 가장 낮게 나타났으며, 10월에 가장 높은

Table 3 Comparison of monthly BFIs and their ranges

Basin	Month	BFLOW	HYSEP	PART	WHAT	Range
Han	1	0.74	0.85	0.94	0.76	0.74 ~ 0.94
	2	0.75	0.82	0.90	0.77	0.75 ~ 0.90
	3	0.72	0.81	0.87	0.73	0.72 ~ 0.87
	4	0.63	0.71	0.84	0.76	0.63 ~ 0.84
	5	0.63	0.73	0.87	0.84	0.63 ~ 0.87
	6	0.64	0.74	0.81	0.77	0.64 ~ 0.81
	7	0.42	0.59	0.64	0.72	0.42 ~ 0.72
	8	0.54	0.69	0.76	0.79	0.54 ~ 0.79
	9	0.66	0.75	0.85	0.86	0.66 ~ 0.86
	10	0.77	0.85	0.91	0.88	0.77 ~ 0.91
	11	0.77	0.83	0.89	0.81	0.77 ~ 0.89
	12	0.71	0.79	0.91	0.84	0.71 ~ 0.91
Nakdong	1	0.80	0.89	0.90	0.80	0.80 ~ 0.90
	2	0.80	0.88	0.91	0.80	0.80 ~ 0.91
	3	0.72	0.75	0.85	0.76	0.72 ~ 0.85
	4	0.67	0.73	0.81	0.77	0.67 ~ 0.81
	5	0.61	0.72	0.83	0.85	0.61 ~ 0.85
	6	0.65	0.74	0.78	0.78	0.65 ~ 0.78
	7	0.49	0.59	0.66	0.76	0.49 ~ 0.76
	8	0.51	0.63	0.64	0.72	0.51 ~ 0.72
	9	0.64	0.74	0.83	0.85	0.64 ~ 0.85
	10	0.71	0.78	0.86	0.85	0.71 ~ 0.86
	11	0.75	0.81	0.86	0.81	0.75 ~ 0.86
	12	0.75	0.84	0.91	0.85	0.75 ~ 0.91

Table 3 Comparison of monthly BFIs and their ranges (continued)

Basin	Month	BFLOW	HYSEP	PART	WHAT	Range
Geum	1	0.68	0.77	0.84	0.76	0.68 ~ 0.84
	2	0.65	0.79	0.82	0.77	0.65 ~ 0.82
	3	0.61	0.72	0.78	0.72	0.61 ~ 0.78
	4	0.59	0.74	0.76	0.73	0.59 ~ 0.76
	5	0.56	0.69	0.77	0.81	0.56 ~ 0.81
	6	0.61	0.70	0.75	0.76	0.61 ~ 0.76
	7	0.54	0.65	0.63	0.72	0.54 ~ 0.72
	8	0.53	0.66	0.63	0.72	0.53 ~ 0.72
	9	0.65	0.75	0.79	0.82	0.65 ~ 0.82
	10	0.71	0.80	0.82	0.81	0.71 ~ 0.82
	11	0.70	0.77	0.80	0.76	0.70 ~ 0.80
	12	0.69	0.79	0.83	0.79	0.69 ~ 0.83
Seomjin Youngsan	1	0.82	0.91	0.91	0.83	0.82 ~ 0.91
	2	0.89	0.89	0.88	0.80	0.80 ~ 0.89
	3	0.73	0.77	0.84	0.78	0.73 ~ 0.84
	4	0.68	0.76	0.78	0.78	0.68 ~ 0.78
	5	0.66	0.75	0.79	0.82	0.66 ~ 0.82
	6	0.65	0.75	0.73	0.76	0.65 ~ 0.76
	7	0.47	0.60	0.60	0.72	0.47 ~ 0.72
	8	0.50	0.65	0.62	0.71	0.50 ~ 0.71
	9	0.62	0.75	0.77	0.83	0.62 ~ 0.83
	10	0.75	0.84	0.87	0.87	0.75 ~ 0.87
	11	0.75	0.81	0.82	0.78	0.75 ~ 0.82
	12	0.75	0.85	0.88	0.84	0.75 ~ 0.88
Total	1	0.76	0.86	0.90	0.79	0.76 ~ 0.90
	2	0.77	0.85	0.88	0.79	0.77 ~ 0.88
	3	0.7	0.76	0.84	0.75	0.70 ~ 0.84
	4	0.64	0.74	0.8	0.76	0.64 ~ 0.80
	5	0.62	0.72	0.82	0.83	0.62 ~ 0.83
	6	0.64	0.73	0.77	0.77	0.64 ~ 0.77
	7	0.48	0.61	0.63	0.73	0.48 ~ 0.73
	8	0.52	0.66	0.66	0.74	0.52 ~ 0.74
	9	0.64	0.75	0.81	0.84	0.64 ~ 0.84
	10	0.74	0.82	0.87	0.85	0.74 ~ 0.87
	11	0.74	0.81	0.84	0.79	0.74 ~ 0.84
	12	0.73	0.82	0.88	0.83	0.73 ~ 0.88

값을 나타냈다. 낙동강 수계에서도 한강 수계와 동일하게 7월과 8월의 BFI가 가장 낮은 값이 산정되었으며, 한강 수계와 달리 낙동강 수계에서는 1월과 2월의 BFI가 가장 높은 값이 산정되었다. 금강 수계에서도 또한 BFI 산정 결과 7월과 8월에 가장 낮은 값을 나타냈다. 하지만 금강 수계에서는 기저유

출 분리 방법에 따라 가장 큰 BFI가 나타난 기간이 다른 수계에 비하여 큰 차이를 보였다. BFLOW와 HYSEP은 10월에 가장 높은 BFI가 산정됐으며, PART는 1월에 그리고 WHAT은 9월에 가장 큰 값을 나타냈다. 하지만 전반적인 BFI의 범위를 비교할 경우 금강 수계에서도 10월 BFI의 범위가 가장

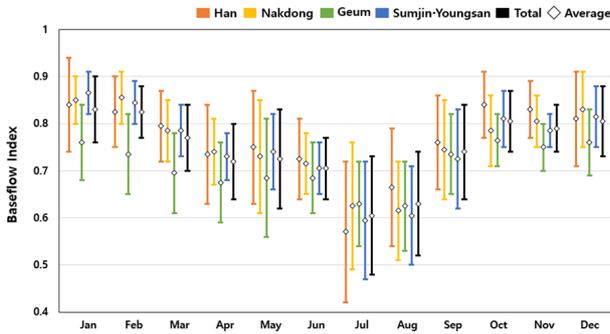


Fig. 4 Monthly BFI ranges of each basin

크게 나타났다. 마지막으로 섬진·영산강 수계에서도 7월과 8월에 가장 낮은 BFI가 산정됐으며, 낙동강 수계와 동일하게 1월과 2월에 가장 높은 BFI가 산정되었다.

전반적으로 4대강 수계에서 모두 여름에 해당하는 7월과 8월의 기저유출 기여도가 가장 낮을 것으로 분석되었다. 또한 한강 수계와 금강 수계에서는 가을에 해당하는 10월에 그리고 낙동강 수계와 섬진·영산강 수계에서는 겨울에 해당하는 1월과 2월에 기저유출 기여도가 가장 큰 것으로 분석되었다. 이는 앞서 ‘계절별 BFI 분석 및 비교’ 부분에서 기술한 것에 상응한 결과로써, 우리나라 수계에서 기저유출 기여도는 계절에 따라 큰 변동성을 가지고 있다는 것을 재차 검증하였다. 따라서 이를 통해 우리나라와 같이 계절별 강수량의 증감이 뚜렷한 지역을 대상으로 기저유출을 분석할 때에는 연 단위 기저유출 분석보다는 계절 또는 월단위 기저유출 분석하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 4대강 수계에서의 하천 유량에 대한 기저유출의 기여도를 평가하기 위하여 최근 5년 동안의 하천유량 자료가 있는 관측소를 선정하고, 총 60개의 유량관측소로부터 유량 자료를 수집하였다. 이렇게 수집한 유량 자료로부터 4가지 기저유출 분리 방법(BFLOW, HYSEP, PART, WHAT)을 활용하여 기저유출의 기여도를 나타내는 BFI를 산정하였으며, 이를 4대강 수계를 대상으로 연별, 계절별, 월별로 분석하여 각각의 분석 기간 단위 별 BFI의 범위값을 제시하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약하였다.

연별 BFI 산정 결과 동일한 수계 내에서도 기저유출 분리 방법에 따라 산정 결과에 큰 차이가 나타났다. 이에 BFI는 단일 방법에서 산정된 특정 BFI 값을 대푯값으로 제시하기 보다는 여러 가지의 기저유출 분리 방법을 통해 산정된 BFI를

고려하여 가능 범위로 제시하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

계절별 분석 결과 4대강 모든 수계에서 봄과 여름의 기저유출 기여도가 낮은 것으로 나타났으며, 가을과 겨울의 기저유출 기여도가 높게 분석되었다. 이러한 결과는 여름철에 집중된 강수량으로 인해 여름철 하천 유량에 대한 직접유출의 기여도가 상대적으로 증가하기 때문으로 판단된다. 이를 근거로 계절 특성이 분명한 국내 하천에 대한 기저유출 분석은 연별 분석보다 계절별 또는 월별 기저유출 분석이 보다 합리적인 것으로 판단되었다.

월별 BFI 분석 결과 여름에 해당하는 7월과 8월의 BFI가 1년 중 가장 낮게 산정되었으며, 가을과 겨울에 해당하는 9월~2월의 BFI가 높게 나타났다. 이는 계절별 기저유출 기여도 분석 결과에 상응하는 것으로, 월별 분석 결과에서도 계절별 하천에서의 기저유출 기여도의 변동은 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 제시한 기저유출 분석 방법은 향후 4대강처럼 대규모 유역뿐만 아니라 중소규모 댐이나 저수지, 하천 상류의 자연유역의 하천유량 분석을 위한 다양한 연구에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 본 연구결과는 시간대별(연, 계절, 월) 기저유출 기여도는 큰 변동성을 가지고 있음을 증명할 수 있는 연구 자료로써, 기저유출 기여도의 변동성을 고려한 체계적이고 기저유출 관리의 중요성을 제시하기 위한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 더 나아가 본 연구의 결과는 하천 건천화와 가뭄과 같은 문제 해결을 위한 중·장기적인 하천관리 계획 수립 시 우선 관리 지역 선정을 위한 하나의 선정 지표로도 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 기후변화로 인한 수자원 관리의 어려움이 증대됨에 따라 기저유출의 중요성이 부각되고 있는 현 상황에서 향후 정확하고 신뢰도 높은 기저유출 연구를 위해서는 실제 하천을 대상으로 한 장기적인 기저유출 모니터링 자료의 수집 및 모니터링 기술에 대한 연구 또한 많이 수행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 2015년도 강원대학교 학술연구구성비지원(과제번호: 520150127)과 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Arnold, J. G., P. M. Allen, R. Muttiah, and G. Bernhardt, 1995.

- Automated baseflow separation and recession analysis techniques. *Ground Water* 33(6): 1010-1018.
2. Bloomfield, J. P., D. J. Allen, and K. J. Griffiths, 2009. Examining geological controls on baseflow index (BFI) using regression analysis: an illustration from the thames basin, UK. *Journal of Hydrology* 373(1): 164-176
 3. Brodie, R. S. and S. Hostetler. 2005. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. In *Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 conference*.
 4. Choi, Y. H., Y. S., Park, J. C. Ryu, D. J. Lee, Y. S. Kim, J. D. Choi, and K. J. Lim, 2014. Analysis of baseflow contribution to streamflow at several flow stations. *Journal of Korean Society on Water Environment* 30(4): 441-451 (in Korean).
 5. Choi, Y. H., D. Kum, J. Ryu, Y. Jung, Y. S. Kim, J. H. Jeon, K. S. Kim, and K. J. Lim, 2015. A study of total nitrogen pollutant load through baseflow analysis at the watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment* 31(1): 55-66 (in Korean).
 6. Cho, S. H., 2006. Computation of baseflow contribution to streamflow using environmental tracers in three small catchments Yuseong, Daejeon. Ph.D diss., Choongnam National University, Daejeon (in Korean).
 7. Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes* 19(2): 507-515.
 8. Eckhardt, K., 2008. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology* 352(1): 168-173.
 9. Han, J. H., K. J. Lim, and Y. H. Jung, 2016. Analysis of relationship between streamflow volatility and basin runoff contribution in the Nakdong river basin. *Korean Society of Agricultural Engineers* 27-38 (in Korean).
 10. Hong, J. Y., K. J. Lim, Y. C. Shin, and Y. H. Jung, 2015. Quantifying contribution of direct runoff and baseflow to rivers in Han river system, South Korea. *Journal of Korea Water Resources Association* 48(4): 309-319 (in Korean).
 13. Hwang, I. S., 2016. Analysis of correlation between physical properties and consolidation parameter of clay in Han and Geum river basin. Chungbuk University 46-47 (in Korean).
 14. Jeong, S. Y. and K. C. Dong, 2010. Correlation analysis between groundwater Level and baseflow in the Geum river watershed, calculated using the WHAT SYSTEM. *The journal of Engineering Geology* 107-116 (in Korean).
 15. Jeong, J. Y., 2006. Continuous streamflow simulation using baseflow separation and Nash's instantaneous unit hydrograph. MS Thesis, Dankook University, Seoul, Korea (in Korean).
 11. Kang, D. S., 2011. Study on the change of river discharge and baseflow considering urbanization and climate change. MS Thesis, Kookmin University, Seoul, Korea (in Korean).
 12. Kang, H. S. and S. M. Jun, 2015. Impact analysis of baseflow on river and ecosystem. *Journal of Korea Water Resources Association* 584-588 (in Korean).
 13. Kang, H. Y., S. H. Lee, J. S. Kim, and Y. I. Mun, 2015. Analysis and typology of hydrological fluctuation tendency of multipurpose dam. *Korean Society of Disaster Prevention* 15: 123-130 (in Korean).
 14. Kim, B. S., H. H. Kwon, and H. S. Kim, 2011. Impact assessment of climate change on drought risk. *Korean Wetlands Journal*, 13(1): 1-11 (in Korean).
 15. Kim, G. and H. Lee, 2009. Impacts of nitrate in base flow discharge on surface water quality, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 29(1B): 105-109 (in Korean).
 16. Korea Meteorological Administration (KMA). <http://www.kma.go.kr/>. Accessed 3 Jan. 2017.
 17. Lee, J. M., Y. H. Jeong, Y. S. Pack, H. W. Kang, K. J. Lim, and H. S. Kim, 2014. Assessment of future climate change impact on groundwater recharge, baseflow and sediment in steep sloping watershed. *Korean Wetlands Journal* 16(2): 173-185 (in Korean).
 18. Lee, S. H., T. J. An, B. M. Yun, and M. P. Shim, 2003. Application of tank model including snow and snowmelt simulations to Soyang river Dam and Chungju Dam. *Journal of Korea Water Resources Association* 851-861 (in Korean).
 19. Lim, K. J., B. A. Engel, Z. Tang, J. Choi, K. S. Kim, S. Muthukrishnan, and D. Tripathy, 2005. Automated web GIS based hydrograph analysis tool, WHAT1. *Journal of the American Water Resources Association* 1407-1416.
 20. Lyne, V. and M. Hollick, 1979. Stochastic time-variable rainfall runoff modelling. In: Hydrology and Water Resources Symposium, Berth. 1979 Proceedings. *National Committee on Hydrology and Water Resources of the Institution of Engineers, Australia* 89-92.
 21. Nam, K. H., G. B. Kim, and G. C. Jeong, 2013. Baseflow comparison using the WHAT system and flow rate measurements in the dry and rainy seasons. *The Geological Society of Korea* 117-125 (in Korean).
 22. Rutledge, A. T., 1998. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and forecasting mean ground-water recharge and discharge from streamflow records: Update. *US Department of the Interior, US Geological Survey, USA*.
 23. Sa, G. H., 2010. Proposals for assessment of the degree of topographic change in consideration of regional characteristics. *Korea Environment Institute* 4-10 (in Korean).
 24. Schilling, K. E. and C. F. Wolter, 2001. Contribution of base flow to nonpoint source pollution loads in an agricultural watershed. *Ground Water* 39(1): 49-58.

25. Seo, J. S., 1975. Geographical study on the seasonal distribution of rainfall in Korea. Ewha University 4-14 (in Korean).
26. Shin, M. H., J. A. Lee, S. U. Chen, Y. J. Lee, K. J. Lim, and J. D. Choi, 2010. Analysis of the Characteristics of NPS Runoff and Application of L-THIA model at Upper Daecheong Reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(1): 1-11 (in Korean).
27. Shirmohammadi, A., J. M. Sheridan, and W. G. Knisel, 1987. Regional application of an approximate streamflow partitioning method. *Journal of the American Water Resources Association* 23: 103-111.
28. Sloto, R. A. and M. Y. Crouse, 1996. HYSEP, a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. *US Department of the Interior, US Geological Survey.*
29. Um, M. J., C. S. Jeong, and W. C. Jo, 2009. Analysis of precipitation distribution in Gangwon-do using spatial analysis 1: Classification of precipitation and analysis of Seasonal and annual average precipitation. *Korean Society of Disaster Prevention* 103-113 (in Korean).
30. Willems, P., 2009. A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall- runoff models. *Environmental Modeling & Software* 24: 311-321.